Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 73-86

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۸۶-۷۳

استفاده از تصویربرداری پیسه پویا برای تعیین غیرتهاجمی خواص مکانیکی سیب درختی

امید امیدی ارجنکی[1*]- داود قنبریان[2]- مجتبی نادری بلداجی[2]- کاوه ملازاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸

چکیده

در این پژوهش امکان استفاده از روش تصویربرداری پیسه پویا با استفاده از لیزر با طول موج ۷۸۰ نانومتر به‌منظور نظارت، ارزیابی و پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب درختی رقم گلدن دلیشز شامل مدول الاستیسیته، حداکثر نیروی تسلیم، چقرمگی، ویسکوزیته و نرمش خزشی در مرحله تازه خوری مورد بررسی و سنجش قرار گرفته است. تصاویر پیسه پویا به کمک نورپردازی لیزری و تصویربرداری از سیب های سالم و کامل، طی چهار روز پس از چینش تهیه شدند. همچنین نمونه‌ها تحت آزمون خزش، نفوذ و فشار تک محوری نیز قرار گرفتند. رابطه کمّی بین داده‌های طیفی و خواص مکانیکی مرجع مرتبط، با کمک سیستم استنتاجی فازی- عصبی (ANFIS) به‌دست آمد. روش‌های تحلیل مؤلفه‌های اصلی و ارزیابی تقاطعی برای انتخاب بهترین و مؤثرترین ویژگی‌ها برای بهبود کارایی مدل‌ها در تعیین خواص مکانیکی مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌ها بر اساس پارامترهای ساختاری انتخاب شده در ANFIS توسعه یافتند. در ادامه، بازدهی آنها برای یافتن بهترین مدل برای پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب با هم مقایسه شدند. طبق نتایج حاصل، از بین تمامی مدل‌های حاصل، مدل پیش‌بینی و تعیین مقدار کرنش شکست با ضریب همبستگی ۰/۹۲۰ و میزان خطای ۰/۰۱۰ به‌عنوان برترین مدل به‌دست آمد. همچنین مدل‌های پیش‌بینی زمان تأخیر (r=0.890) و ویسکوزیته تأخیری (r=0.886) دقت مناسبی را ارائه کردند. نتایج کلی نشان داد که روش تصویربرداری پیسه پویا توانایی رضایت‌بخشی برای ارزیابی و پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب درختی دارد.

واژه‌های کلیدی: آزمون نفوذ، پیش‌بینی، تصویربرداری لیزری، خزش، فشار تک محوری

مقدمه

ساختار و کیفیت بافت میوه‌های تازه به واریته، میزان رسیدگی و منطقه کشت و همچنین شرایط پس از برداشت آن وابسته است. توصیف خواص و ویژگی‌های میوه به‌طور گسترده با تعیین ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی آنها صورت می‌گیرد. در طول فرآیند رسیدن سیب درختی، گوشت آن با از دست دادن فشار درون سلولی[4]، کاهش میزان نشاسته و یا افت و شکست دیواره سلول‌های آن نرم شده و بنابراین خواص مکانیکی آن تغییر می‌کند (Rahemi, 2005). از این‌رو ارزیابی و اندازه‌گیری خواص مکانیکی سیب درختی به‌منظور افزایش توانایی رقابت برای عرضه‌کنندگان میوه لازم و ضروری است.

ارتباط بین کیفیت میوه و تغییرات فیزیولوژیک در پژوهش‌های متعددی مورد بررسی قرار گرفته است (Alamar *et al*., 2008; Cena *et al*., 2013; Varela *et al*., 2007). در این پژوهش‌ها، بافت سیب و خواص مکانیکی معمولاً توسط نتایج حاصل از آزمون‌های مرجع مبتنی بر نیرو- جابه‌جایی، ضربه و ارتعاش توصیف شده‌اند (Holt and Schoorl, 1984; Masoudi *et al*., 2007; Mendoza *et al*., 2012; Tscheuschner and Du, 1988). روش‌های فوق، مخرب، زمانبر و ارائه‌کننده نتایج متغیر در میوه‌ای نسبت به میوه دیگر و از موقعیتی نسبت به موقعیت دیگر هستند و همچنین توانایی به‌کارگیری در روش‌های برخط را نیز ندارند. به‌منظور غلبه بر این معایب، سیستم‌های غیرمخرب گوناگونی، برای ارزیابی کیفی میوه‌ها توسعه داده شده است. در میان آنها، روش‌های نوری مختلفی، مانند طیف‌نگاری مرئی/ مادون قرمز[5]، طیف‌نگاری بازتابشی زمان معین[6]، تصویربرداری پس پراکنش ابرطیفی[7] و پس پراکنش لیزری[8] غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mollazade *et al*.,

۱- دانش‌آموخته دوره دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: omidmac@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v9i1.68953
4- Turgor pressure

5- VIS/NIR spectroscopy
6- Time-resolved reflectance spectroscopy
7- Hyperspectral backscattering imaging
8- Laser induced backscattering

2013). با این وجود تلاش‌هایی برای توسعه روش‌هایی با عملکرد بالاتر توسط پژوهشگران صورت می‌گیرد.

روش پیسه‌زیستی[1] یک روش غیرمخرب برای تحلیل پارامترهای حیات و جنبش در مواد زیستی است. روش پیسه‌زیستی مبتنی بر نوعی پدیده نوری است که در زمان نوردهی یک محصول با یک نور همدوس مانند لیزر ایجاد می‌گردد. هنگام نوردهی یک محصول با لیزر، پرتوهای پراکنش شده با یکدیگر تداخل می‌کنند و الگوی دانه دانه‌ای تصادفی، شامل نقاط تاریک و روشن را در آشکارساز شکل می‌دهند. اگر در نمونه نوردهی شده هیچ‌گونه فعالیت زیستی وجود نداشته باشد، تصویر و الگوی حاصل از آن نیز ثابت خواهد بود. اما در مواد زیستی توزیع نقاط در این الگو نسبت به زمان، نوسانی و با دگرگونی همراه است (Adamiak *et al*., 2012; Zhao *et al*., 1997). اولین استفاده از روش پیسه‌زیستی، به‌منظور تحلیل فعالیت پیسه‌زیستی و تغییرات فرآیندهای گوناگون در سلول گزارش شده است (Zdunek *et al*., 2014).

در یک پژوهش، تغییرات فعالیت پیسه در نگهداری کوتاه مدت شش روزه سیب درختی مورد مطالعه قرار گرفت (Ansari and Nirala, 2013). در این پژوهش از یک لیزر هلیوم- نئون به‌عنوان منبع نور استفاده شد. همبستگی بین فریم‌های متوالی در تصاویر به‌دست آمده به‌عنوان ویژگی تصاویر پیسه مورد ارزیابی قرار گرفت. در طول نگهداری شش روزه، فعالیت پیسه کاهش و همبستگی فریم‌ها افزایش یافته بود. در پژوهشی مشابه از نمونه‌های سیب به مدت چهار ثانیه، با کمک لیزری در طول موج ۶۳۵ نانومتر فیلم پیسه تهیه شد. همچنین سفتی سیب‌ها با روش‌های مخرب اندازه‌گیری گردید. در این پژوهش مقدار همبستگی به‌دست آمده بین نتایج تصاویر پیسه‌ای و اطلاعات آزمون‌های مخرب رضایت‌بخش به‌دست نیامد (r=0.42) (Adamiak *et al*., 2012). این روش در پژوهشی برای ارزیابی سفتی سیب درختی در چهار مرحله قبل از برداشت نیز استفاده شده است. در این ارزیابی، تصاویر پیسه‌زیستی، در طول موج ۶۳۵ نانومتر تهیه و همبستگی بین تصاویر متوالی محاسبه شد. نتایج بررسی نشان داد که یک رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۸۹۰- بین سفتی و شاخص فعالیت پیسه‌زیستی وجود داشت. همچنین در نتایج گزارش شده است که این روش پتانسل خوبی برای ارزیابی غیر مخرب سفتی در مراحل پیش از برداشت دارد (Szymanska-Chargot *et al*., 2012). در پژوهشی دیگر، تغییرات سفتی سیب درختی در تازه‌خوری[2] نیز با این روش مورد تحلیل قرار گرفته است. در این پژوهش مشاهده شد که شاخص فعالیت پیسه‌زیستی (همبستگی بین تصاویر متوالی) در زمانی‌که سیب درختی سفتی خود را از دست می‌دهد کاهش می‌یابد (Zdunek and Cybulska, 2011). به‌نظر می‌رسد، به‌دلیل اینکه نور لیزر توانایی گذر از پوست و نفوذ به بافت سیب تا عمق ۷ تا ۱۰ میلی‌متری را دارد (Zhao *et al*., 1997)، امکان دریافت اطلاعاتی درباره شرایط بافت و سلول‌های زیر پوست و احتمال کشف و مشاهده تغییرات آنها و به دنبال آن توانایی برای ایجاد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده خواص مکانیکی سیب درختی وجود داشته باشد. با این‌حال تاکنون تنها ویژگی مکانیکی بررسی شده در پژوهش‌ها خاصیت سفتی بوده است. بنابراین هدف کلی پژوهش حاضر امکان‌سنجی و توسعه مدل‌های مبتنی بر تصویربرداری پیسه زیستی برای ارتباط و پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب‌های درختی رسیده از نوع گلدن دلیشز، در طول نگهداری کوتاه مدت است.

مواد و روش‌ها

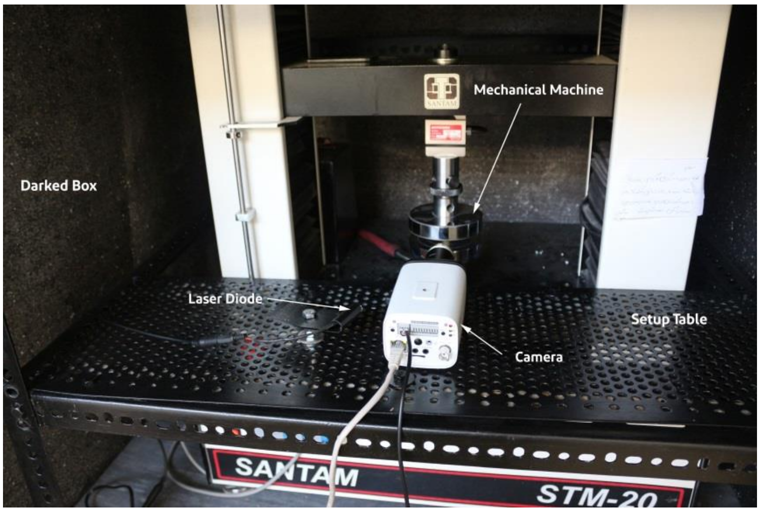
تعداد ۴۰۰ سیب درختی تازه و سالم، رقم گلدن دلیشز در مرحله رسیدگی تجاری در شهریور ۱۳۹۴ از باغی در استان چهارمحال و بختیاری برداشت شد. سیب‌ها به‌منظور داشتن حداکثر همسانی ممکن در اندازه، شکل و رنگ، رسیدگی و کیفیت با دقت انتخاب و چیده شدند. همه نمونه‌های انتخاب شده بدون آسیب، کوفتگی و لکه و دارای قطر میانگین ۷۳ تا ۷۸ میلی‌متر بودند. سیب‌ها پس از برداشت در صندوق‌هایی بسته‌بندی شدند. سیب‌ها در محیط خنک (۵ تا ۷ درجه سلسیوس) و مرطوب (۷۰ تا ۸۵ درصد رطوبت نسبی) به مدت ۴ روز با هدف تازه‌خوری نگهداری شدند. نمونه‌های سیب قبل از آزمون‌های مکانیکی و تصویربرداری، به مدت ۱۲ ساعت نیز در شرایط محیطی آزمایشگاه قرار می‌گرفتند. در مرحله اول برای هر سیب تصویربرداری مرتبط با پیسه‌زیستی اجرا و سپس آزمون‌های مخرب فشار تک محوری، خزش و نفوذ بر روی آن انجام گردید.

تصویربرداری و تحلیل پیسه‌زیستی

سیستم تصویربرداری پیسه زیستی استفاده شده در این پژوهش شامل یک منبع نور، یک اتاقک تصویربرداری، یک دوربین و یک رایانه بود. دوربین (DH-IPC-HF8301E, China) دارای سنسور CMOS و مجهز به یک لنز با دریچه دیافراگم متغیر (2.8–12 mm, 1.3" CCTV lens) بود. موقعیت قرارگیری دوربین نسبت به استوای سیب، عمود و در فاصله ۲۰ میلی‌متری تنظیم شد. همچنین لیزر ۵ میلی‌وات با طول موج ۷۸۰ نانومتر (Arefi *et al*., 2016) و مجهز به یک لنز برای تنظیم قطر پرتو به ۳ میلی‌متر نیز وظیفه پرتودهی به نمونه را داشت که در نزدیکی نمونه و دوربین نصب گردید. طبق نتایج پیش آزمون‌ها، زاویه بین دوربین و لیزر در حدود ۳۲ درجه و فاصله بین لیزر و نمونه در حدود ۲۵۰ میلی‌متر تنظیم شد. به‌منظور

1- Biospeckle
2- Shelf-life

ممانعت از بازتابش محیطی، تمامی تجهیزات در یک اتاقک تاریک و بسته نصب و تصویربرداری در آن انجام گردید. برای تصویربرداری، هر سیب مقابل دوربین و لیزر قرار گرفت و ۴۸۰ تصویر در ۳۰ فریم در ثانیه و در مدت ۱۶ ثانیه ضبط شد (شکل ۱). تصاویر پیسه با قالب AVI بهمنظور تحلیل و بررسی در رایانه ذخیره شدند. تمامی فرآیندهای تحلیل و بررسی تصاویر و دادهها توسط نرمافزار MATLAB نسخه ۲۰۱۵ صورت گرفت.



شکل ۱- سیستم آزمون مکانیکی و تصویربرداری پیسه زیستی

Fig. 1. Mechanical test machine and biospeckle imaging system

الگوی پیسه تاریخچه زمانی[1] بهعنوان یک رویکرد مرجع برای تحلیل و بررسی تصاویر پیسهزیستی بافتهای زنده بهکار میرود. این الگو با کنار هم قرار دادن ستون یا ردیف میانی ماتریس هر فریم در فیلم AVI ذخیره شده در کنار هم ایجاد میشود. خطوط افقی یا عمودی این الگو نشاندهنده تغییرات شدت پیسهها در طول زمان خواهد بود (Arizaga *et al*. 1999). برای هر سیب درختی، تصویر THSP نهایی در ابعاد ۴۰۰ × ۵۰۰ پیکسل بهدست آمد. شاخصهایی که در این پژوهش بهمنظور تحلیل تصاویر پیسهزیستی مورد استفاده قرار گرفتند به دو دسته ویژگیهای «آماری» و «ویژگیهای بافتی» تقسیم شدند. سه ویژگی آماری بهعنوان ویژگیهای THSP شامل تابع خودهمبستگی[2]، ممان اینرسی[3] و قدر مطلق اختلافات[4] و چهار ویژگی بافتی شامل ماتریس هم اتفاقی سطح خاکستری[5]، ماتریس طول گام سطح خاکستری[6]، الگوی دودویی محلی[7] و تبدیل موجک[8] برای تحلیل تصاویر در نظر گرفته شدند.

1- Time History Speckle Patter (THSP)
2- Autocorrelation function
3- Inertia moment (IM)
4- Absolute value of differences (AVD)
5- Gray level co-occurrence matrix (GLCM)
6- Gray level run length matrix (GLRLM)
7- Local binary pattern (LBP)
8- Wavelet transform (WT)

ویژگیهای آماری THSP

خود همبستگی یک تابع ریاضی است که همبستگی تقاطعی از یک متغیر را با خودش در دو نقطه از زمان طبق رابطه (۱) محاسبه میکند (Arizaga, 2009):

$$Af(\tau) = f(-\tau)^{*} \otimes f(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\, f^{*}(t-\tau)\, dt \qquad (۱)$$

در رابطه بالا f(t) سیگنال داده شده، Af(τ) پیچش پیوسته تابع خودهمبستگی[9]، و τ وقفه زمانی است. تعداد وقفهها در این پژوهش ۱۰۰ در نظر گرفته شد. مقدار ممان اینرسی (IM) از ماتریس هم اتفاقی محاسبه گردید. ماتریس هم اتفاقی نیز توسط رابطه (۲) از تصویر THSP بهدست آمد (Arizaga, 2009):

$$COM=[N_{ij}] \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، N_{ij} تعداد دفعاتی را مشخص میکند که جفت پیکسلهای با شدت مشخص در موقعیتهای i و j بهصورت متوالی قرار دارند. این ماتریس میتواند شامل مقادیر صفر یا غیرصفر حول قطر اصلی خودش باشد. در فعالیت بالا تعداد مقادیر غیرصفر افزایش پیدا میکند. ممان اینرسی، توصیفکننده توزیع مقادیر غیرصفر توسط رابطه (۳) است (Arizaga, 2009):

9- Continuous convolution autocorrelation function

$$IM = \sum_{ij} NCOM_{ij} \left(i-j\right)^2 \quad (۳)$$

که در آن NCOM بیانگر ماتریس هم اتفاقی نرمال شده است. علاوه بر این، در ارزیابی یک پدیده با میزان فعالیت متوسط، می‌توان از یک ممان اینرسی تغییرداده شده‌ای با ارائه رابطه پیشنهاد شده (۴) استفاده کرد (Braga *et al*., 2005):

$$AVD = \sum_{ij} NCOM_{ij} \times \left|i-j\right| \quad (۴)$$

این رابطه جدید میزان قدر مطلق اختلافات را محاسبه می‌کند. قدر مطلق اختلافات در فعالیت کم کاهش می‌یابد.

ویژگی‌های بافتی

ماتریس هم اتفاقی تشریح شده در بخش قبلی می‌تواند در جهات (θ) و فواصل (d) مختلف محاسبه شود. بدین ترتیب ماتریس هم اتفاقی هر تصویر پیسه‌زیستی با استفاده از مقدار d=1 پیکسل و با زاویه θ=0 درجه محاسبه شد. در نهایت ۲۲ ویژگی از هر ماتریس هم اتفاقی برای هر نمونه به‌دست آمد. لیست این ویژگی‌های به‌دست آمده در جدول ۱ ارائه شده است. در ماتریس طول گام سطح خاکستری، میزان زبری بافت یک تصویر با رمزگذاری و کدگذاری جزئیات بافتی آن مبتنی بر تعداد وقوع هر سطح خاکستری، در جهات معین ثبت می شود. یک گام، رشته‌ای از پیکسل‌های متوالی است که در طول یک جهت خطی معین، شدت سطح خاکستری یکسان دارند. در این ماتریس، مقدار هر عنصر بیانگر تعداد کل رخداد طول گام j در سطح خاکستری i در جهت معین θ است. ماتریس‌های طول گام، استخراج و در نهایت ۱۱ ویژگی موجود در جدول ۱ برای هر تصویر THSP حاصل شد.

الگوی دودویی محلی به‌عنوان یک معیار اندازه بافت در مقیاس خاکستری، مشتقی از تعریفی عمومی از بافت در یک همسایگی محلی است. در این روش برای هر پیکسل موجود در تصویر، یک پنجره همسایگی ۳ در ۳ در نظر گرفته شده و مقدار شدت پیکسل‌های همجوار با مقدار پیکسل مرکزی مقایسه می‌شود. اگر مقدار شدت پیکسل‌های هم‌جوار بزرگتر یا مساوی مقدار شدت پیکسل مرکزی بود مقادیر آنها با ۱ جابه‌جا می‌گردد. در غیر این صورت مقدار آنها صفر می‌شود. در نهایت پیکسل مرکزی با مجموع وزن دار شده دودویی پیکسل‌های همجوار جابه‌جا و پنجره همسایگی به پیکسل بعدی انتقال می‌یابد (Ojala *et al*., 2002). در نهایت، ۸ ویژگی تشریح شده در جدول ۱ از هیستوگرام الگوی دودویی محلی از هر تصویر THSP به‌دست آمد.

تبدیل موجک گسسته، یک تصویر را با استفاده از یک بانک فیلتر به چندین موجک جزئی تجزیه می‌کند. بدین ترتیب چهار مجموعه ضرایب در هر سطح از تجزیه به‌دست می‌آید. در این تجزیه چهار مجموعه از ضرایب به نام‌های جزئیات تقریب، افقی، عمودی و قطری حاصل می‌شوند (Choudhary *et al*., 2008). تصاویر THSP توسط موجک مادر دابوچی درجه چهار در چهار سطح تجزیه شدند. در هر سطح از تجزیه ضرایب تقریب و ضرایب موجک به‌عنوان ویژگی‌های استخراج شده در نظر گرفته شدند. بنابراین چهار ویژگی آماری میانگین، انحراف معیار، انتروپی و انرژی از هر سطح استخراج گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی

در جدول ۲ عنوان تمامی خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده در این پژوهش نشان آورده شده است. آزمون‌های فشار تک محوری، خزش و نفوذ توسط دستگاه آزمون مواد SANTAM مدل STM-20 مجهز به یک نیروسنج ۵۰۰ نیوتنی و نرم‌افزار کنترل SANTAM نسخه ۴/۰۶ انجام گرفت. دستگاه مجهز به یک فک ثابت و یک فک متحرک موازی، با نرخ سرعت و حرکت معین بود. هر نمونه سیب با تیغ تیز و با دقت به دو نیم تقسیم شد. نیمی برای استخراج نمونه‌های استوانه‌ای (۱۵×۱۵ میلی‌متر) برای آزمون‌های فشاری تک محوری و خزش و نیم دیگر برای انجام آزمون نفوذ در نظر گرفته شد. فاصله بین مکان استخراج دو نمونه استوانه‌ای از هر سیب به منظور اطمینان از استخراج نمونه‌ها از موقعیت‌های متفاوت، بین ۳ تا ۴ میلی‌متر فرض شد. آزمون فشاری تک محوری با نرخ سرعت ۲۵/۴۰ میلی‌متر در دقیقه و در دمای محیط صورت پذیرفت.

در هر آزمون، نمونه بر روی فک ثابت و تا لحظه شکست تحت فشار و نیرو قرار گرفت. منحنی نیرو- تغییر شکل ثبت و برای تعیین شیب لحظه‌ای مورد نیاز در محاسبه مدول الاستیسیته مماسی (رابطه ۶)، با یک چند جمله‌ای درجه سه (رابطه ۵) برازش شد.

$$F(\Delta)=a_0\cdot\Delta L+a_1\cdot\Delta L^2+a_2\cdot\Delta L^3 \quad (۵)$$

$$E_a = \left(\frac{F/A}{\Delta L/L}\right) = \left.\frac{dF}{d\left(\Delta L\right)}\right|_{\%Comp.} \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \quad (۶)$$

در رابطه بالا L و ΔL به‌ترتیب طول اولیه نمونه و تغییرات آن برحسب میلی‌متر و F نیروی محوری بر حسب نیوتن است. به‌علاوه، تنش و کرنش در منطقه شکست و انرژی شکست برای محاسبه چقرمگی نیز تعیین گردید. حداکثر انرژی از سطح زیر منحنی نیرو- تغییر شکل و چقرمگی از تقسیم حداکثر انرژی بر حجم نمونه محاسبه شدند. مدول‌های الاستیسیته متناسب با تراکم ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰ درصد از کرنش و همچنین در نقطه شکست محاسبه شدند. مدول الاستیسیته سکانتی نیز از گرادیان شیب خطی اولیه در منحنی‌های حاصل در آزمون فشاری تک محوری حاصل شد (شکل ۲).

جدول ۱- عناوین ویژگی‌های هدف در انواع روش‌های استخراج ویژگی

Table 1- Available texture features measured by statistical techniques for each THSP image

Method – نوع روش	**Feature – نام ویژگی**	
الگوی دودویی محلی (LBP) (Ojala *et al*., 2002)	• Mean gray level • Standard deviation • Smoothness • Skewness	• Uniformity (energy) • Entropy • Kurtosis (4th moment) • Coefficient of variation
ماتریس هم اتفاقی سطح خاکستری (GLCM) (Clausi, 2002; *Ojala et al*., 2002)	• Autocorrelation • Contrast • Correlation • Cluster Prominence • Cluster Shade • Dissimilarity • Energy • Entropy • Homogeneity • Maximum probability • Sum entropy	• Sum average • Sum variance • Sum of squares: Variance • Difference variance • Difference entropy • Information measure of correlation1 • Information measure of correlation2 • Inverse difference (INV) • Inverse difference normalized • Inverse difference moment normalized • High gray level run emphasis (HGRE)
ماتریس طول گام سطح خاکستری (GLRLM) (Ojala *et al*., 2002)	• Short run emphasis (SRE) • Long run emphasis (LRE) • Gray level non- uniformity (GLNU) • Run length non-uniformity (RLNU) • Run percentage (RP) • Low gray level run emphasis (LGRE)	• Short run low gray level emphasis (SRLGE) • Short run high gray level emphasis (SRHGE) • Long run low gray level emphasis (LRLGE) • Long run high gray level emphasis (LRHGE) • High gray level run emphasis (HGRE)

در آزمون خزش، نمونه‌ها متوجه تنش ثابت شده و تغییر شکل به‌عنوان تابعی از زمان، اندازه‌گیری شد. سرعت بارگذاری در این آزمون نیز مانند آزمون فشاری تک محوری در نظر گرفته شد. رفتار خزشی را می‌توان توسط مدل برگر توصیف کرد. مدل برگر، با اتصال سری یک واحد ماکسول و یک واحد کلوین، کرنش خزشی میوه را به‌صورت رابطه (۷) توصیف می‌کند:

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma}{E_0}+\frac{\sigma}{E_1}\left[1-exp\left(-\frac{t}{T_{ret}}\right)\right]+\frac{\sigma t}{\eta_0} \qquad (۷)$$

با تقسیم دو طرف رابطه (۷) بر تنش ثابت σ، مدل برگر به شکل نرمش خزشی در می‌آید:

$$D(t)=D_0+D_1\left[1-exp\left(-\frac{t}{T_{ret}}\right)\right]+\frac{t}{\eta_0} \qquad (۸)$$

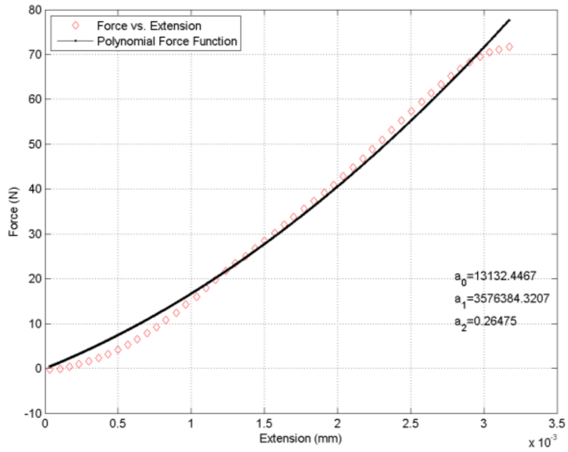
در رابطه (۸)، T_{ret} بیانگر مدت زمان لازم برای ایجاد ۶۳/۲ درصد تغییر شکل در واحد کلوین است (Yang *et al*., 2006). همچنین به کمک رابطه بالا مقادیر $D_0= 1/E_0$، $D_1= 1/E_1$ و کرنش توسط مقدار تنش ثابت به نرمی خزشی تبدیل می‌شود تا میزان تغییرات نرمی نسبت به زمان را به‌منظور به‌دست آوردن پارامترهای مدل بتوان توسط یک منحنی نشان داد. در نهایت نتایج تحلیل خزش برای سیب‌ها با اعمال کرنش ثابتی به مقدار ۰/۰۴۲ مگاپاسکال به مدت ۵ دقیقه به‌دست آمد.

در آزمون نفوذ، از یک نفوذگر فولادی با سر شبه‌کروی به قطر ۱۰ میلی‌متر و با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و با محدودیت نفوذ ۲۰ میلی‌متر در گوشت نمونه استفاده شد. این آزمون در دو حالت نمونه بی‌پوست و با پوست انجام گردید. هنگام انجام آزمون، منحنی نیرو- تغییر شکل ثبت و مورد تحلیل قرار گرفت و بدین ترتیب برای هر نمونه حداکثر نیروی نفوذ و انرژی (با اندازه‌گیری سطح زیر منحنی) محاسبه شدند (Qing *et al*., 2007).

توسعه مدل‌های پیش‌بینی

هدف این بخش توسعه مدل‌های پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب درختی است. اینکار با استفاده از سیستم استنتاجی تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS) صورت پذیرفت. این سیستم مزایای

شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاجی فازی مبتنـی بـر قانون را با هم دارد. ورودی فرآیند مدل‌سازی، مجموعه ویژگـی‌هـای نرمال شده در بازه صفر تا ۱ از تصاویر THSP و خروجی آن خـواص مکانیکی نمونه‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۲- منحنی نیرو- تغییر شکل حاصل از آزمون فشاری تک محوری به همراه برازش چند جمله‌ای درجه سه
Fig. 2. Force-Deformation curve in compression test with fitted polynomial curve

با توجه به این نکته که سیستم ANFIS هنگام افزایش ورودی‌ها به بیش از ۳ ورودی مستعد نفرین ابعادی[1] می‌شـود و در ایـن حالـت، زمان آموزش با زیاد شدن مجموعه‌های فـازی نسـبت بـه متغیرهـای ورودی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد، یکـی از فرآینـدهای مناسـب کاهش ابعاد بردار ورودی استفاده از تحلیل مؤلفه‌هـای اصـلی (PCA) است. این روش پیشتر نیز توسط محققانی در این زمینه استفاده شـده اسـت (Mollazadeh *et al.*, 2013). بنـابراین ورودی‌هـا بـا اعمـال PCA، محدود به سه مقدار و به سیستم ANFIS ارائه شدند. به دلیل اینکه بازدهی ANFIS به میزان زیادی وابسته بـه سـاختار آن اسـت، تنظیمات چهارگانه مشخصی برای تغییر ساختار آن بـه‌منظـور یـافتن بهترین مدل برای پیش‌بینی خواص مکـانیکی سـیب درختـی بـه‌کـار گرفته شد. این تنظیمات شامل تغییر تعداد توابع عضویت در بازه ۲ تـا ۵، تغییر نوع توابع عضویت ورودی (مثلثی، ذوزنقـه‌ای، زنگـی شـکل، گوسی، ضرب دو تابع سیگمویدی، گوسی ترکیبی، پی شکل و تفاضل بین دو تابع سیگمویدی)، تغییر نوع تـابع عضـویت خروجـی (ثابـت و خطی) و روش بهینه‌سازی (ترکیبی یا پس انتشار) بودند. هر مدل (۱۷ خاصـیت مکـانیکی× ۲ روش بهینـه‌سـازی× ۲ نـوع تـابع عضـویت خروجی× ۸ نوع تابع عضویت ورودی× ۴ حالت در تعداد توابع عضویت ورودی= ۲۱۷۶ مدل) با مشخصـات اختصاصـی، بـا اسـتفاده از روش ارزیابی تقـاطعی K-Fold، (K=1) ۱۰ بـار اجـرا و بهتـرین مـدل بـا بهترین دقت و کمترین خطا برگزیده شد. همچنین بـرای رسـیدن بـه بازدهی بهتر در پیش‌بینی خواص مکانیکی، همه داده‌ها به سه قسمت جداگانه بـرای آمـوزش، ارزیـابی و آزمـون پـیش‌بینـی بـه‌ترتیـب بـا نسبت‌های ۷۰، ۱۰ و ۱۰ درصد تقسیم شدند. پیمایش و کالیبراسـیون مدل‌ها برای خواص مکانیکی با استفاده از داده‌های آموزش و ارزیابی انجام شد. سپس دقت مدل‌های به‌دست آمده برای داده‌هـای مسـتقل از آموزش مورد بررسی قرار گرفتند. بازدهی مدل‌ها توسط معیارهـایی از قبیل ریشه میانگین مجذور خطاهـا در مراحـل ارزیـابی تقـاطعی و پیش‌بینی (RMSECV و RMSEP)، ضرایب همبسـتگی در مراحـل کالیبراسیون و پیش‌بینی (r_P و r_C) و میانگین خطای بایاس (MBEC و MBEP) با هم مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج آماری مانند میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار تمامی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در آزمون‌های مکانیکی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که از جدول ۲ و نیز شکل ۴ قابل مشاهده اسـت، با افزایش میـزان تـراکم یـا کـرنش در محاسـبه مـدول الاستیسـیته مماسی، مقدار محاسبه شـده مـدول نیـز افـزایش یافتـه اسـت. البتـه انتخاب مقادیر دلخواه برای تراکم‌های چندگانه برای محاسـبه مـدول الاستیسیته مماسی، بر روی مقادیر نتیجه شده و حساسیت این ویژگی در بیان وضعیت مقدار کیفـی ضـریب ارتجـاع نمونـه‌هـا و همچنـین به‌دست آوردن شیب منحنی در نمودار نیرو- جابه‌جایی برای تخمـین مناسب مدول الاستیسیته مماسی اثر مستقیم و مهم دارد. سـیب‌هـای مورد آزمون نسبتاً محدوده وسیعی از مقادیر خواص مختلف مکـانیکی و رئولوژیک را در بر گرفتند کـه بـرای توسـعه مـدل‌هـای ارزیـابی و پیش‌بینی قابل اعتماد، مفید بود.

1- Curse of dimensionality

جدول ۲- نتایج آماری خواص مکانیکی

Table 2 - Statistical information of mechanical properties

نوع آزمون Test Type		خاصیت مکانیکی Property	میانگین Mean	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	انحراف معیار St. deviation
نفوذ Penetration Test	با پوست W Skin	Penetration force (N)	71.511	101.190	28.200	14.879
		Penetration energy (mJ)	271.698	422.520	88.484	0.075
	بدون پوست WO Skin	Penetration force (N)	43.399	69.770	14.800	10.177
		Penetration energy (mJ)	132.834	277.769	31.608	0.051
فشاری تک محوری Uniaxial Compression Test	Tangent modulus of elasticity (MPa)	2.5%	0.433	1.722	-0.166	0.400
		5%	0.085	1.909	-0.040	0.422
		7.5%	1.214	2.488	0.023	0.459
		10%	1.534	2.876	0.066	0.495
	Secant modulus of elasticity (MPa)		1.680	2.490	0.400	0.386
	Failure stress (MPa)		0.504	0.740	0.250	0.098
	Failure strain (%)		32.720	95.260	16.720	0.098
	Toughness (mJ/mm^3)		0.077	0.222	0.026	0.028
خزش Creep	Initial compliance D_0 (MPa^{-1})		1.329	1.395	1.390	0.001
	Retarded compliance D_1 (MPa^{-1})		0.050	0.242	0.033	0.022
	Viscosity η (Pa.s) ×10^3		6.448	10.082	2.035	1.552
	Retardation time T_{ret} (s)		66.244	207.147	56.475	15.148

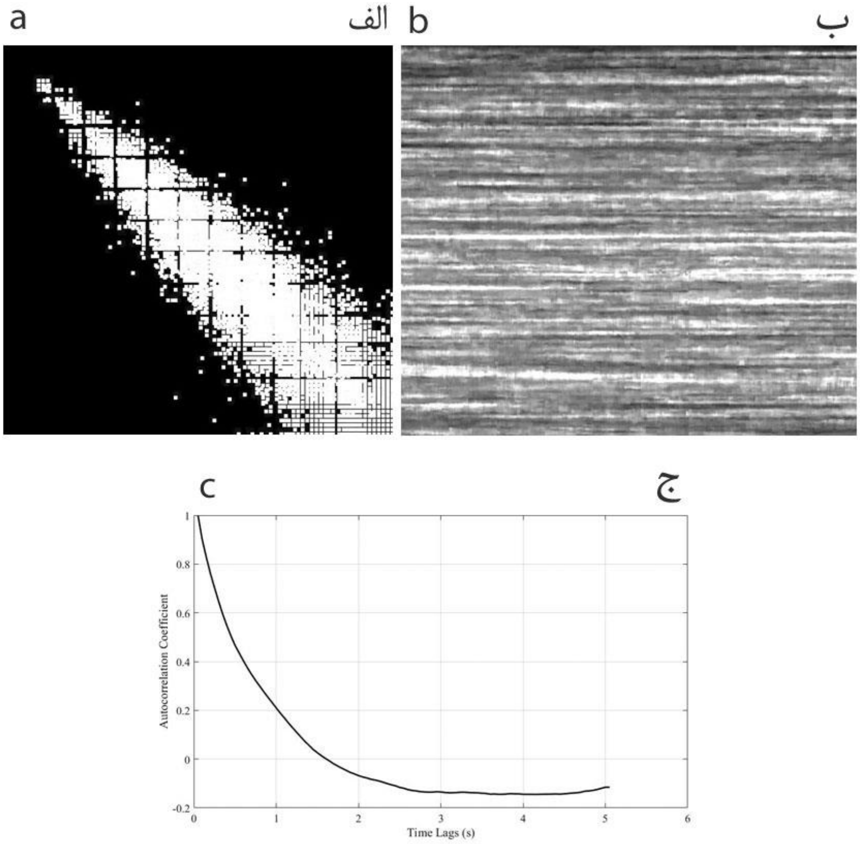
نتایج آزمون مقایسه میانگین آماری مربوط به شاخص‌های تـنش و کرنش شکست، مدول الاستیسـیته آنـی و تـأخیری، زمـان تـأخیر، ویسکوزیته و نیروی نفوذ در حالت با پوست در طول ۴ روز آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. نتایج بیانگر افزایش معنی‌دار تنش و کرنش شکست و همچنین کاهش نیروی نفوذ در حالت بـا پوسـت در طـول دوره دارد. مقدار تنش و کرنش شکست در روز اول ۴۹۵ کیلوپاسـکال و ۰/۲۸۲ درصد به‌دست آمد که این مقادیر پس از روز چهارم به‌ترتیب به ۵۰۱ کیلـو پاسـکال و ۰/۳۵۵ درصـد افـزایش پیـدا کردنـد. بـاقی پارامترهای ارائه شده در جدول ۳، همانطور که مشـاهده مـی‌شـود در طول دوره ۴ روزه‌دارای اختلافات معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با سایر روزهای آزمایش هستند. این نتایج نشـان‌دهنـده فعالیـت بـالای فیزیولوژیکی میوه سیب است.

جدول ۳– مقایسه میانگین آماری خواص مکانیکی و رئولوژیک متغیر سیب ها در طول دوره نگهداری

Table 3 - Statistical comparing mean information of mechanical properties

Day روز	Failure stress (kPa)	Failure strain (%)	Initial Elastic Modulus (MPa)	Retarded Elastic Modulus (MPa)	Retardation time (s)	Viscosity (kPa.s)	Penetration force (S) (N)
1	495 a	0.282 b	1.0 ab	21.013 b	78.233 b	1.125 b	75.570 b
2	478 a	0.287 b	1.065 a	20.59 b	70.453 c	1.359 c	72.337 c
3	491 a	0.273 b	1.13 a	23.215 a	63.538 a	1.468 a	69.618 a
4	501 b	0.355 a	0.92 b	21.68 b	64.304 a	1.482 a	69.332 a

نمونه‌ای از الگوی پیسه زیستی (THSP) ایجاد شده در طول موج ۷۸۰ نانومتر در شکل ۳-ب آمده و تغییرات زمانی الگوی پیسـه در آن قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۳-الف، تجمع مقادیر غیرصـفر حول قطر اصلی ماتریس هم اتفاقی استخراج شده از تصـویر THSP مشاهده می‌شود. فعالیت پیسه‌زیستی توسط تابع خود همبستگی نیز در شکل ۳-ج توصیف شده است. بـا توجـه بـه اینکـه در فعالیـت بـالا، همبستگی بین فریم‌های متوالی کاهش می‌یابد و سبب افت سریع‌تـر در مقدار تابع خود همبستگی می‌شود، رفتار منحنی نتیجه شده از تابع خود همبستگی قابل توصیف است.



شکل ۳- نمونه‌ای از تصویر THSP (ب) و ماتریس هم اتفاقی حاصل از آن (الف)، تابع خودهمبستگی (ج)

Fig.3. b: The biospeckle pattern at the wavelength of 780 nm; a: The concentration of non-zero values around the principal diagonal of GLCM; c: Autocorrelation function

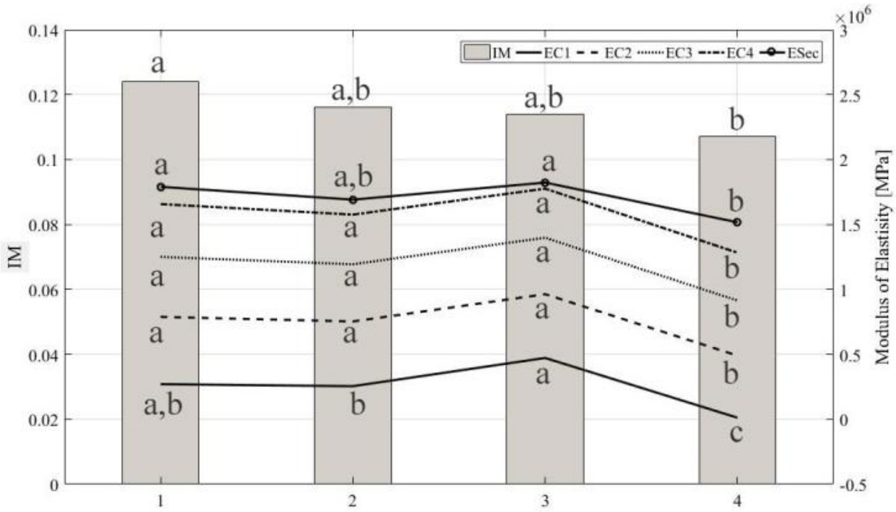
نتایج نشان داد که در طول نگهداری سیب‌ها در طی چهار روز مقدار ویژگی IM به‌طور معنی‌دار کاهش پیدا کرده است و این کاهش همراه با کاهش مقادیر پنج‌گانه مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده بود (شکل ۴). سیب گلدن دلیشز، در پوست خود تعداد زیادی منافذ کوچک دارد که با چشم دیده نمی‌شوند. به دلیل وجود این منافذ در این نوع سیب درختی، میوه پس از برداشت می‌تواند آب زیادی را از دست بدهد که متعاقباً بر روی شرایط ساختاری آن اثرگذار خواهد بود. تغییرات ساختاری میکروسکوپی در سلول‌ها بر روی تغییرات ماکروسکوپی بافت مؤثر است (Cho 1999; Cho *et al*., 1997). بدین ترتیب به‌همراه کاهش قابلیت ارتجاعی بافت سیب‌ها به سبب از دست دادن آب، میزان فعالیت زیستی و متعاقباً شاخص این فعالیت نیز در طول ۴ روز کاهش داشته است. همچنین تغییرات فیزیولوژیک ایجاد شده به سبب هیدرولیز شدن نشاسته و اسیدهای آمینه در طول فرآیند رسیدگی به کربوهیدرات‌های ساده مانند کلوگز می‌تواند سبب کاهش شاخص فعالیت نیز باشد (Szymanska-Chargot *et al*., 2012). تأثیر وجود دانه‌های نشاسته در نمود فعالیت پیسه، پیشتر در پژوهش‌هایی به اثبات رسیده است (Adamiak *et al*., 2012; Szymanska-Chargot *et al*., 2012; Ansari and Nirala, 2013).

نتایج مدل‌های پیش‌بینی

بهترین نتایج آماری از مجموعه مدل‌های ممکن برای پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب درختی رقم گلدن دلیشز در جدول ۴ ارائه شده است. در جدول بهترین مدل پیش‌بینی از هر خاصیت مکانیکی با ضریب تبیین، RMSE، ضریب تبیین و MBE آن ارائه شده است. طبق جدول ۳، با مقایسه همه روش‌های استخراج ویژگی، تبدیل موجک و GLRLM عملکرد بهتری را در اکثر مدل‌ها به دلیل ارائه نتایج بهتر در پیش‌بینی خواص مکانیکی ارائه کرده‌اند. کارایی خوب روش استخراج ویژگی GLRLM را می‌توان به تغییرات بزرگ مقادیر طول گام در زمان تغییر در خواص مکانیکی در تصاویر پیسه‌زیستی نسبت داد.

مدل پیش‌بینی حداکثر کرنش شکست، بیشترین ضریب همبستگی (r_p=0.920) و به دنبال آن مدل پیش‌بینی زمان تأخیر (r_p=0.890)، ویسکوزیته تأخیری (r_p=0.886) و حداکثر نیروی نفوذ

در حالت با پوست (r_p=0.883) از بهترین مدل‌های نتیجه شده بودند.



شکل ۳– مقایسه تغییرات مقدار ممان اینرسی و مدول های الاستیسیته در تراکم های چهارگانه و مدول سکانتی در چهار روز نگهداری

Fig.4. IM, tangent and secant modulus of elasticity in four compression levels duration storage

جدول ۳- مشخصات بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی خواص مکانیکی با استفاده از روش‌های استخراج ویژگی

Table 3 – Best mechanical properties prediction model using of different texture analysis technique

Mechanical Property[a]		Texture analysis technique	Type of mf		No. of input mf	Optim. method	Calibration			Prediction		
			Input[b]	Output			$RMSE_{CV}$	MBE_C	r_c	$RMSE_P$	MBE_P	r_p
Toughness		GLRLM	Tri	Linear	2	Back-pro	0.029	0.007	0.732	0.005	0.011	0.869
Break stress		Wavelet	DSig	Constant	3	Back-pro	0.091	0.034	0.732	0.030	0.067	0.823
Break strain		GLCM	Pi	Constant	3	Hybrid	0.047	0.016	0.730	0.010	0.016	0.920
Modulus of elasticity[c]	2.5%	Wavelet	Gauss2	Constant	2	Back-pro	0.060	0.110	0.851	0.056	0.071	0.821
	5%	Wavelet	GBell	Constant	3	Back-pro	0.087	0.043	0.709	0.120	0.099	0.778
	7.5%	GLRLM	Gbell	Constant	2	Back-pro	0.028	0.110	0.798	0.030	0.103	0.791
	10%	GLCM	Pi	Linear	3	Hybrid	0.072	0.166	0.783	0.034	0.074	0.880
	Secant	GLCM	Pi	Linear	3	Back-pro	0.067	0.016	0.702	0.033	0.143	0.843
Creep Test	D_0	LBP	Gauss	Linear	3	Back-pro	0.028	0.030	0.822	0.034	0.028	0.808
	D_1	THSP	DSig	Linear	3	Back-pro	0.095	0.048	0.640	0.075	0.055	0.790
	T_{ret}	THSP	PSig	Constant	2	Hybrid	0.010	0.007	0.747	0.010	0.003	0.890
	η_0	GLRLM	Pi	Constant	3	Back-pro	0.021	0.019	0.919	0.067	0.129	0.728
	η_1	Wavelet	Pi	Linear	3	Back-pro	0.421	0.291	0.827	0.165	0.189	0.886
Penet. with skin	Enrg	GLRLM	Trap	Linear	3	Back-pro	0.269	0.056	0.707	0.117	0.102	0.816
	F	THSP	Pi	Linear	2	Back-pro	0.096	0.135	0.693	0.056	0.071	0.883
Penet. without skin	Enrg	Wavelet	Gauss	Linear	2	Back-pro	0.118	0.069	0.639	0.120	0.099	0.879
	F	Wavelet	Trap	Linear	3	Back-pro	0.246	0.166	0.682	0.030	0.103	0.853

a: F: Force, E: Energy, S-S: Stress-Strain, D_0: Initial compliance, D_1: Retarded compliance, η: Viscosity.
b: Tri: Triangular, Trap: Trapezoidal, Psig: Product of two sigmoidal functions, DSig: Difference between two sigmoidal functions, GBell: Generalized bell-shaped, Gauss: Gaussian, Gauss2: Gaussian combination, Pi: Π-shaped.
c: In 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% of initial length.

کمترین دقت در بین مدل‌ها نیز مدل پیش‌بینی ویسکوزیته اولیه (r_p=0.728) به‌دست آمد. مدل‌ها برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته با ضرایب همبستگی ۰/۸۲۱، ۰/۷۷۸، ۰/۷۹۱، ۰/۸۸۰ و ۰/۸۴۳ به‌ترتیب برای تراکم‌های ۲/۵، ۵/۰، ۷/۵، و ۱۰ درصد و همچنین برای مدول سکانتی به‌دست آمدند. این نتایج به‌دست آمده با نتایج گزارش شده توسط بقیه پژوهشگرانی که از انواع روش‌های نوری برای این منظور استفاده کردند قابل مقایسه است. در پژوهشی، با استفاده از لیزری با طول موج ۶۶۰ نانومتر، ضریب همبستگی ۰/۸۶۱ برای پیش‌بینی سفتی و مدول الاستیسیته (اندازه‌گیری شده توسط دستگاه بافت‌سنج) برای سیب‌های رقم گلدن دلیشز به‌دست آمد (Mollazade *et al*., 2013). در پژوهش‌های مشابهی، ضرایب همبستگی ۰/۸۳۰ و ۰/۸۷۰ برای خاصیت سفتی گزارش شده است (Lu, 2004; Lafuente *et al*., 2013; Jamshidi *et al*., 2015). همچنین در پژوهش‌هایی به کمک روش‌های گران قیمت چندطیفی و ابرطیفی، برای تخمین سفتی سیب ضرایب همبستگی ۰/۷۴ تا ۰/۸۹ به‌دست آمده است (Lu, 2007; Mendoza *et al*., 2011; Peng and Lu, 2005, 2006). در همه گزارشات فوق از روش اندازه‌گیری نفوذ مگنس تیلور[1] در دستگاه بافت‌سنج برای اندازه‌گیری سفتی استفاده شده است. هرچند کارایی مدل‌ها در پیش‌بینی مدول الاستیسیته سیب در این پژوهش چندان رضایت‌بخش حاصل نشد، اما نزدیک به نتایج گزارش شده پژوهش‌های دیگر به‌دست آمد. می‌توان ادعا کرد که روش پیسه‌زیستی نسبت به روش‌های گرانقیمت دیگر به‌عنوان یک روش غیرمخرب و ارزان قیمت در تخمین مدول الاستیسیته و خواص دیگر رئولوژیکی مانند ویسکوزیته تأخیری، زمان تأخیر و حداکثر کرنش شکست جایگزین مناسبی باشد.

نتیجه‌گیری

روش نوری تشریح شده در این پژوهش، مبتنی بر پدیده پیسه‌زیستی ارائه‌کننده یک روش نوآورانه و قابل‌اطمینان برای کشف غیرمخرب و سریع خواص مکانیکی است. نتایج ارزیابی نشان داد که با گذشت زمان سیب‌های تازه چیده شده به علت از دست دادن آب هم در میزان قابلیت ارتجاعی و هم در شاخص فعالیت پیسه‌زیستی دچار افت می‌شوند. همچنین مدل‌های حاصل از خروجی‌های روش تصویربرداری پیسه‌زیستی می‌تواند برخی خواص مکانیکی را با دقت مناسب پیش‌بینی کند. مشخصاً نتایج حاصل در پژوهش حاضر رضایت‌بخش است و می‌تواند نشان‌دهنده قابلیت و پتانسیل مناسب استفاده از روش تصویربرداری پیسه‌زیستی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی سیب درختی رقم گلدن دلیشز به‌منظور استفاده در تازه‌خوری باشد. در پرتو این نتایج، این کار می‌تواند اساس و پایه‌ای برای پیاده‌سازی یک سیستم خودکار مبتنی بر قابلیت تصویربرداری پیسه‌زیستی برای تعیین خواص مکانیکی سیب درختی گلدن دلیشز در هنگام تازه‌خوری در آینده باشد که از نقطه نظر فرآیندهای پس از برداشت و کشاورزی اهمیت به‌سزایی خواهد داشت. اگرچه پیش از کاربردهای عملی و تجاری، تحقیقات بیشتری بر روی این روش تصویربرداری در انواع دیگر میوه سیب درختی ضروری به‌نظر می‌رسد. علاوه بر این برخی مسائل مانند قابل حمل بودن تجهیزات برای بررسی تمامی سطح میوه و یا توانایی تصویربرداری در تعداد طول موج‌های متنوع با سرعت بالا نیز در عملی کردن این روش در کاربردهای تجاری نیز بایستی در نظر گرفته شوند. همچنین بایستی عملکرد مدل‌ها و مدت زمان لازم برای تصویربرداری را ارتقا داد. اجرای روش بررسی شده در این پژوهش نسبت به روش‌های مرسوم قدیمی و همچنین روش‌های هزینه‌بری مانند روش‌های ابرطیفی و چند طیفی صرفه اقتصادی بهتری دارد چرا که در این روش هزینه تجهیزات لازم نسبت به ماشین‌های آزمون و تجهیزات طیف‌سنجی مواد بسیار پایین‌تر است.

References

1. Adamiak, A., A. Zdunek, A. Kurenda, and K. Rutkowski. 2012. Application of the Biospeckle Method for Monitoring Bull’s Eye Rot Development and Quality Changes of Apples Subjected to Various Storage Methods-Preliminary Studies. Sensors 12: 3215-3227.
2. Alamar, M. C., E. Vanstreels, M. L. Oey, E. Molto, and B. M. Nicolaı. 2008. Micromechanical behaviour of apple tissue in tensile and compression tests: Storage conditions and cultivar effect. Journal of Food Engineering 86: 324-333.
3. Ansari, M. D., and A. K. Nirala. 2013. Biospeckle activity measurement of Indian fruits using the methods of cross-correlation and inertia moments. Optik 124: 2180-2186.
4. Arefi, A., P. A. Moghaddam, A. Hassanpour, K. Mollazade, and A. M. Motlagh. 2016. Non-destructive

1- Magness-Taylor (MT)

identification of mealy apples using biospeckle imaging. Postharvest Biology and Technology 112: 266-276.
5. Arizaga, R. 2009. Methods of dynamic speckle analysis statistical analysis. PP 65-114 in J. K. Rabal and B. Jr. eds. Dynamic Laser Speckle and Applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York.
6. Arizaga, R., M. Trivi, and H. Rabal. 1999. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. Optics and Laser Technology 31: 163-169.
7. Braga, R. A., G. F. Rabelo, L. R. Granato, E. F. Santos, J. C. Machado, R. Arizaga, H. J. Rabal, and M. Trivi. 2005. Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique. Biosystem Engineering 91: 465-469.
8. Cena, H., R. Lub, F. Mendozab, and R. M. Beaudryc. 2013. Relationship of the optical absorption and scattering properties with mechanical and structural properties of apple tissue. Postharvest Biology and Technology 85: 30-38.
9. Cho, Y. 1999. Firmness parameters for evaluation of apple freshness. KSAM 1999 Winter Conferences. Korean SOC. Agr. Machinery, Suwon, Korea.
10. Cho, Y., Y. J. Han, and J. Lee. 1997. Feasibility of laser vision for evaluating fruit quality. Food Engineering Progress 1: 137- 142.
11. Choudhary, R., J. Paliwal, and D. S. Jayas. 2008. Classification of cereal grains using wavelet, morphological, colour, and textural features of non-touching kernel images. Biosystem Engineering 99: 330-337.
12. Clausi, D. A. 2002. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. Canadian Journal of Remote Sensing 28: 45-62.
13. Holt, J. E., and D. Schoorl. 1984. Mechanical Properties and Texture of Stored Apples. Journal of Texture Studies 15: 377-394.
14. Jamshidi B., A. Arefi, S. Minaie. 2017. Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns. Journal of Agricultural Machinery 1: 140-151. (In Farsi).
15. Lafuente, V., J. Val, C. Urzola, and I. Negueruela. 2013. Determination of quality parameters in apple 'Smoothee Golden Delicious' using backscattering laser imaging. in M.F.P.C.M. Costa eds. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications. SPIE Proceedings, University of Porto, Faculty of Sciences, Porto, Portugal.
16. Lu, R. 2004. Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. Postharvest Biology and Technology 31: 147-157.
17. Lu, R. 2007. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety 1: 19-27.
18. Masoudi, H., A. Tabatabaeefar, and A. M. Borghaee. 2007. Determination of storage effect on mechanical properties of apples using the uniaxial compression test. Canadian Biosystems Engineering 49: 3.29-23.33.
19. Mendoza, F., R. Lu, and H. Cen. 2012. Comparison and fusion of four nondestructive sensors for predicting apple fruit firmness and soluble solids content. Postharvest Biology and Technology 73: 89-98.
20. Mollazade, K., M. Omid, F. A. Tab, Y. P. Kalaj, S. S. Mohtasebi, and M. Zude. 2013. Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. Computers and Electronics in Agriculture 98: 34-45.
21. Ojala, T., M. Pietikäinen, and T. Mäenpää. 2002. Multiresolution grey-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 24: 971-987.
22. Peng, Y., and R. Lu. 2005. Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness. Transactions of the ASAE 48 (1): 235-242.
23. Peng, Y., and R. Lu. 2006. Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. Postharvest Biology and Technology 41: 266-274.
24. Qing, Z., B. Ji, and M. Zude. 2007. Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. Journal of Food Engineering 82: 58-67.
25. Rahemi, M. 2005. Postharvest physiology: an introduction to physiology and handling of fruits, vegetables and ornamental plants. Shiraz University Publication, Shiraz, Iran. (In Farsi).
26. Szymanska-Chargot, M., A. Adamiak, and A. Zdunek. 2012. Pre-harvest monitoring of apple fruits

development with the use of the biospeckle method. Scientia Horticulturae 145: 23-28.

27. Tscheuschner, H. D., and D. Du. 1988. Modelling of Mechanical Properties of Apple Flesh under Compressive Load. Journal of Food Engineering 8: 173-186.
28. Varela, P., A. Salvador, and S. Fiszman. 2007. Changes in apple tissue with storage time: Rheological, textural and microstructural analyses. Journal of Food Engineering 78: 622-629.
29. Yang, J. L., Z. Zhang, A. K. Schlarb, and K. Friedrich. 2006. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. Part II: modeling and prediction of long-term performance. Polymer 47: 6745-6758.
30. Zdunek, A., A. Adamiak, P. M. Pieczywek, and A. Kurenda. 2014. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: a review. Optics and Lasers in Engineering 52: 276-285.
31. Zdunek, A., and J. Cybulska. 2011. Relation of biospeckle activity with quality attributes of apples. Sensors 11: 6317-6327.
32. Zhao, Y., J. Wang, X. Wu, F. W. Williams, and R. J. Schmidt. 1997. Point-wise and whole-field laser speckle intensity fluctuation measurements applied to botanical specimens. Optics and Lasers in Engineering 28: 443-456.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 73-86

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۸۶-۷۳

Use of Biospeckle Imaging to Measure Mechanical Properties of Apples in the Non-invasive Manner

O. Omidi-Arjenaki[1*]- D. Ghanbarian[2]- M. Naderi-Boldaji[2]- K. Mollazadeh[3]

Received: 24-11-2017
Accepted: 27-02-2018

Introduction

The texture of fresh fruit is determined by the structural and mechanical properties of tissue. It depends on climate, maturity, variety and postharvest condition. During ripening, due to loss of turgor, degradation of starch and cell walls, the flesh of apple softens. The relationship between fruit quality and its physiological changes has been widely investigated. Using techniques according to the principles of force-deformation, impact, and vibration tests, texture of fruit and its mechanical properties can be associated, conventionally. In analyzing the vitality of biomaterials; a non-invasive technique based on the optical phenomenon is the Biospeckle method which occurs when the surface of the sample is illuminated by laser light. It seems that because of the fact that the laser light can penetrate tissue, it is possible to obtain information about the texture and cell condition from tissue under the skin. This means that, there would be a chance to detect and monitor the variation of cells and try to make a model to predict mechanical properties. Therefore, the overall objective of this study was to develop prediction models based on biospeckle imaging to predict mechanical properties of ripe Golden Delicious apples.

Materials and Methods

The 400 fresh and intact *'Golden Delicious' apples* were harvested and were prepared for mechanical tests and biospeckle imaging. Biospeckle imaging was carried out first, followed by compression and creep test and then penetration test. During imaging, to avoid environmental reflections, the process was carried out in a dark and closed chamber. Biospeckle activity was saved as a video (AVI format) in a computer for analyzing. The THSP method was used to analyze biospeckle activity in samples. The indices which have been used for analyzing biospeckle images are divided into 3 statistical features and 4 textural features.

Apples were cut in half. One of the halves was used for cylindrical sample extraction for uniaxial compression and creep tests and another was used for penetration test. From compression tests the tangent modulus of elasticity, stress and strain of bio-yield and failure energy for toughness calculation were determined. The creep behavior was obtained by fitting the Burger's model to the experimental data. In penetration test, a stainless steel probe with a hemispherical tip was used for peeled and unpeeled samples. For each sample maximum penetration force and energy were obtained.

Prediction of mechanical property was carried out using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). To reduce the dimension of the input vector the PCA was used. Four significant adjustments were made in the structure of ANFIS in order to find the best models. The models were evaluated using RMSECV, RMSEP, MBEC, MBEP, RC, and RP.

Results and Discussion

Models for modulus of elasticity prediction have Rp=0.821, 0778, 0.791, 0.880, and 0.843 for 4 compression rate and secant modulus, respectively. Clearly, the results from this research are encouraging, indicating the potential of using speckle imaging system for predicting apple fruit mechanical properties. Comparing to the all texture analysis techniques, Wavelet and GLRLM provided good results for most properties leading to select them as the best techniques for analysis of biospeckle images because of their consistency in prediction performance. Prediction model for break strain has the highest Rp (Rp=0.920) followed by the retarded time (Rp=0.890), retarded viscosity (Rp=0.886) and maximum penetration force in unpeeled case (Rp=0.883). A

1- PhD in Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Associate Professor of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
3- Assistant Professor of Biosystem Engineering, University of Kordestan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: omidmac@gmail.com)

lower correlation (Rp = 0.728) was observed for initial viscosity.

Conclusions

The described optical method based on biospeckle represents an innovative and reliable method for rapid and non-invasive detection of mechanical properties. The results of the evaluation showed that, as time passes, fresh apples due to the loss of water in both the elasticity and the biospeckle activity were dropped. Biospeckle imaging can accurately predict mechanical properties. The average accuracy of best prediction of mechanical properties models was R^2=0.899. The present results can provide the basis of future development of in-line quality monitoring during apple quality control.

Keywords: Creep test, Laser imaging, Penetration test, Prediction, Uniaxial compression test